

# カusp磁場へ入射された電子ビームの運動エネルギーと、

## プラズマの静電ポテンシャル分布の観測

Observation of kinetic energy of injected electron beam  
and electrostatic potential distribution in the cusp magnetic field

安藤利得<sup>(A)</sup>, 小谷野 開<sup>(A)</sup>, 塚原信也<sup>(A)</sup>, 田澤尚賢<sup>(A)</sup>, 中田健斗<sup>(A)</sup>, 佐藤杉弥<sup>(B)</sup>, 飽本一裕<sup>(C)</sup>

A: 金沢大学, B: 日本工業大学, C: 帝京大学

Ritoku ANDO<sup>(A)</sup>, Haruki KOYANO<sup>(A)</sup>, Shinya TSUKAHARA<sup>(A)</sup>,

Takatoshi TAZAWA<sup>(A)</sup>, Kento NAKADA<sup>(A)</sup>, Sugiya SATO<sup>(B)</sup>, Kazuhiro AKIMOTO<sup>(C)</sup>

Kanazawa Univ.<sup>(A)</sup>, Nippon Institute of Technology<sup>(B)</sup>, Teikyo Univ.<sup>(C)</sup>

### 1. はじめに

極カusp (Polar Cusp) は磁石の極に相当する部分で、高緯度地方の上空にある磁気圏の一部分である。本来は惑星間空間に開いた漏斗状の形をしているが太陽風の圧力で変形して非対称な形状となっている。カuspの上層部では磁場により高エネルギーの粒子などが閉じ込められ、高エネルギー粒子が観測されている<sup>[1]</sup>。これは、磁力線に垂直な方向の加速であると考えられるが、その発生機構などについては波動現象が関与していると考えられるがよく分かっていない。また、磁力線に沿った方向にも加速された粒子が観測されており、カusp粒子と呼ばれる<sup>[2], [3]</sup>。しかしながら、極カuspを含めた極地方の磁力線の多くは地球磁気圏全体と繋がっているため、話はカuspだけでは閉じずにその全貌を理解するためには地球磁気圏全体の動きも同時に理解する必要がある。磁気圏システムは非常に複雑でその全容を把握することは簡単なことではないが、コンピューターの力を借りて総合的に理解しようという試みがなされており、それにより深い理解が得られている<sup>[4]</sup>。しかしながら、現状で用いられているシミュレーションではカusp部分はまだまだ正確に取り扱われているとは言えない。個々の物理について掘り下げて調べることも必要である。

我々はカusp部付近でどのような静電ポテンシャルが形成され、この静電ポテンシャルの影響下で粒子がどのように加速されるかを明らかにしたいと考えている。最終的には宇宙で観測される粒子の加速機構のうちこのポテンシャルによる加速がどの程度の割合を占めるかを明らかにしたい。我々はそのためにカusp磁場へ電子ビームを入射する実験を行なっている。電子ビームの加速からポテンシャルの有無を判断する予定である。一方で電子ビームはプラズマの生成にも併用する。この実験では非常に重要な役割を担う。前回までの実験において、カusp磁場にプラズマを対称かつ広範囲に生成するための大口径電子銃の開発などを行ってきた<sup>[5]</sup>。今回はポテンシャルと粒子の加速を測定する目的のために2つの測定器を製作し、計測を行った。

### 2. 実験装置

#### (i) 本体

本実験に用いる“高密度磁化プラズマ発生装置”は全長約 500 cm、内直径約 74 cm の真空チャンバーを持つ。図 1(a) 参照。装置には主磁場コイルが複数設置され、また、本体の片方の端には補助磁場コイル 1 つが設置されている。これらの 2 種類のコイルを使ってカusp磁場を形成する。今回は主磁場コイルで -140 Gauss (-50 A)、そして補助コイルで 98 Gauss (55 A) の磁場条件で実験を行なっ

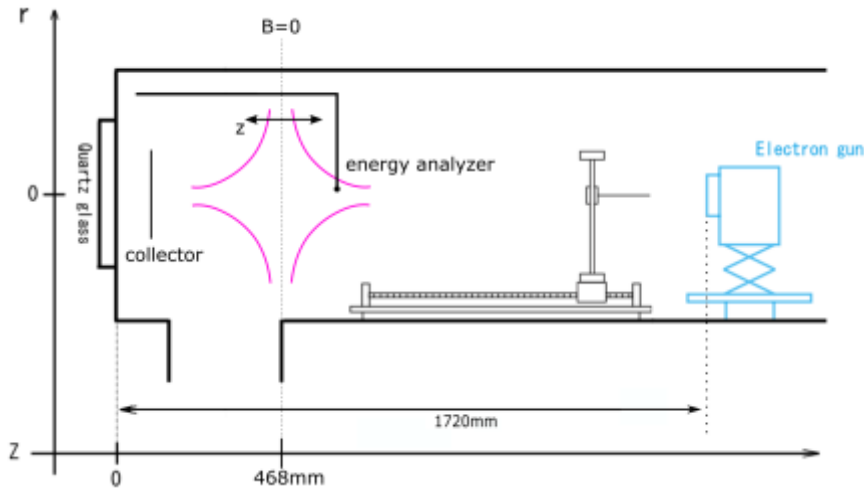


Fig.1 Experimental setup (Side view).

た。この条件では  $Z=46.8\text{ cm}$  の位置で（中心軸上の磁場がゼロとなり、）カस्प面が作られる。ここで、 $Z$ 軸は装置の主軸に沿って取り、装置の端を原点にとる（図1）。今回用いた有効径  $\phi 120\text{ mm}$  の大口径電子銃は  $Z=172\text{ cm}$  の位置に（電子銃の）アノードが来るように設置した。また、電子銃の中心を装置の中心軸上に合わせることで、 $Z$ 軸から半径  $6\text{ cm}$  より内側の領域から電子ビームを入射した。今回の実験では加速電圧は  $60\text{ V}$  に設定した。真空チャンバーは中性ガス (Ar) を  $1.45 \times 10^{-2}\text{ Pa}$  で薄く満たした上で、 $Z$ 軸と平行に電子ビームを入射する。電子ビームは中性ガスと衝突して、ビームの経路上にプラズマを生成する。また、我々の実験装置では、図1から分かるように電子銃と相対する真空チャンバーのフランジには大型のクォーツガラスが設置されている。カस्प磁場越しに電子ビームがこの絶縁体に飛び込むとクォーツガラス表面がチャージアップする可能性があるため、クォーツガラスの前面にアースに接地した可動のコレクター板を設置することにした。ここではカस्प面より電子銃側を「前方」、クォーツガラス側を「後方」と呼ぶ。

## (ii) 測定器

測定にはラングミュアプローブ (Disk Probe) とマルチ・グリッド型静電アナライザ (Retarding Field Energy Analyzer; 以降はエネルギーアナライザと呼ぶ) を用いた。ラングミュアプローブには直径  $7\text{ mm}$  のステンレス製ディスクを用いた。このディスクの面の片面を絶縁塗料で覆い、測定面を電子銃に向けて設置した。これにより電子ビームを含めたプラズマのパラメーターを測ることができる。この電極に  $-70\text{ V} \sim +70\text{ V}$  の電圧範囲で掃引し、流入する電流を測ることによって電圧-電流曲線を得る。そこから、プラズマの電子密度や空間電位、電子温度といったパラメータを求めた。また、電子のエネルギー分布関数を得るためにエネルギーアナライザを用いた。アナライザは2枚のグリッドとコレクター電極を持つ。電子銃に開口部を向ける形で  $Z$ 軸と平行に設置した。以上2つの測定器を  $Z$ 軸上で移動させ空間分布を測定した結果を報告する。

## 3. 実験結果

ラングミュアプローブの測定結果を図2に示す。(a)電子温度  $T_e$ , (b)電子密度  $n_e$ , (c)浮遊電位  $V_f$ , (d)空間電位  $V_s$  である。これより、 $n_e$  はカस्प面  $Z=46.8\text{ cm}$  の位置でピークを持つことがわかる。また、 $T_e$  と  $V_s$  の2つはカस्प面の後方にピークを持ち、電子密度のピークとは異なるのが特徴的である。

次にエネルギーアナライザの測定結果を図3に示す。示したのはカस्प面 ( $Z=46.8\text{ cm}$ ) とその前後

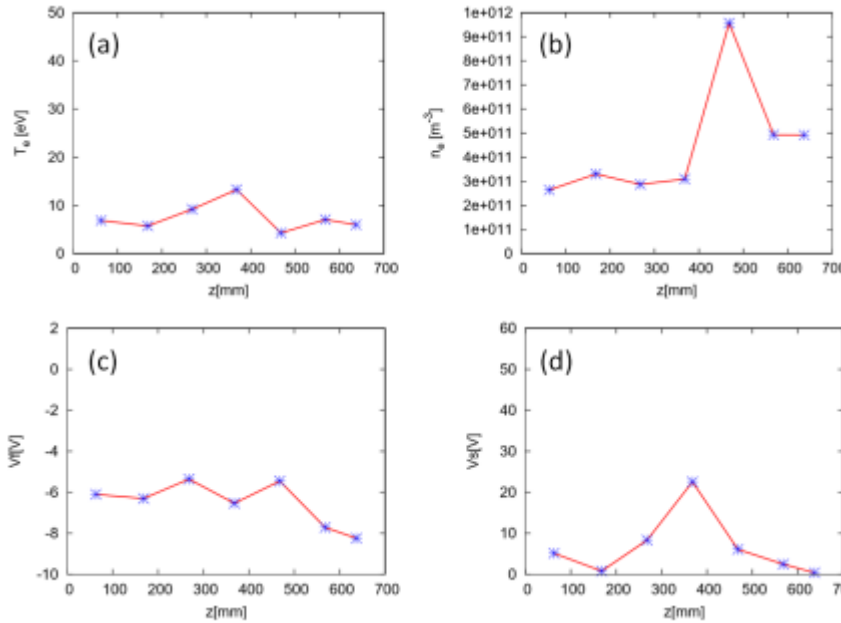


Fig.2 Spatial distributions of (a) Electron temperature, (b) Electron density, (c) Floating potential, (d) Space potential,  $V_{acc}=60$  V. Cusp surface is located at  $Z=468$  mm.

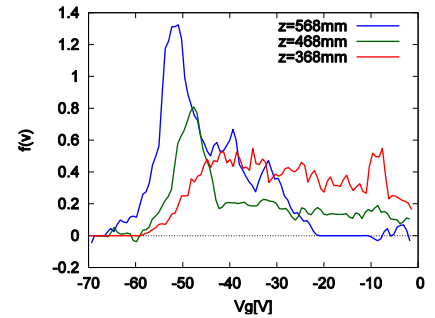


Fig.3 Energy distribution functions of electron observed by RFEA.

10 cm ( $Z=56.8$  cm と  $36.8$  cm) の位置で観測された電子のエネルギー分布である。まず、カusp 前方ではピークが加速電圧より少し低いエネルギーで観測される。これは電子ビームと思われるが、カusp 面の位置ではピークがより低エネルギー側に移動している。また、カusp 面後方ではさらにピークが目立たなくなって  $40$  V 以下の低エネルギー成分が増え、連続してつながっている。信号が出始める立ち上がりの位置 (高エネルギー側の端) も  $Z$  が小さくなるにつれ次第に低エネルギー側に移動している。これらの変化はカusp 面の前後  $10$  cm で起きており、その距離は電子銃からカusp 面前方までの距離と比べて小さく、カusp 面近傍での変化が目立つ。

## 4. 考察

### (i) 単粒子の軌道計算

まず、今後の研究を進める際の足掛かりにするために、電子銃から出る電子ビームの軌道を知る事が有効であると考え、単粒子の軌道計算プログラムを作成して電子軌道の計算を行った。このプログラムの計算で用いる磁場はコイルの配置から計算した。計算に際して  $Z$  軸上でガウスメータを用いて測定し、計算値とよく一致することを確認した。

ここでの計算では電子ビームは電子銃の位置から  $Z$  軸に平行に入射した。一般にカusp 面近傍では径方向の磁場  $B_r$  が存在するため、磁場方向の速度  $v_z$  の入射粒子は方位角方向  $\theta$  にローレンツ力  $v_z \times B_r$  を受ける。そのため  $Z$  軸に平行に入射してきた入射粒子はカusp 面を通過すると旋回運動を始める。その結果、 $v_z$  は減少し、 $\theta$  方向の速度  $v_\theta$  が増加する。例えば、カusp 面を半径  $r=1$  cm で通過する電子ビームの場合は  $v_z$  が通過前よりも約  $30\%$  減少する。さらに大きな  $r$  では、 $v_z$  の減少は大きくなり、反対に  $r=0$  を通過する入射粒子は何も力を受けずに通過できる。その詳細を調べるために、電子銃のカソード表面から射出する位置を少しづつ変えて、その後の軌道を計算した。結果は電子銃のカソードから出射される半径  $r$  によって軌道は以下のように大まかに  $3$  種類に分類する事ができることがわかつ

た。(a)  $r = 0 \sim 0.16$  cm の範囲：中心軸付近から入射される電子ビームは、そのままカusp面を透過し、反対側のコレクター板に衝突する。(b)  $r = 0.16 \sim 1.35$  cm の範囲：中心からこの範囲のドーナツ状の領域から入射される電子ビームは、カuspを中心に複数回反射された後にラインカusp、もしくは入射方向へ返り消失する。つまり、一時的にもカusp磁場に捕捉された状態になる。(c)  $r = 1.35 \sim 6$  cm の範囲：周辺から入射される電子ビームは、磁力線に沿って動き、ミラーで反射されることなく直接チャンバーに衝突する。以上、3つの領域に分類できるが、それらの半径からカソード面上で面積換算をすると各領域は(a)0.07%、(b)5%、(c)94.9%に相当することがわかった。

## (ii) 実験結果の考察

この実験ではプラズマ生成は電子ビームに依存しているので両者は切り離して考えることができない。それを念頭にして実験結果について考察する。まず、測定結果のうちカusp面近傍で電子密度がピークを持つことについて考察する。(b)に分類される電子ビームがカusp中央部で捕捉され、かつ、プラズマを生成すること。加えて、(a)(b)(c)全てのビームが寄与してカusp面前方で生成されたプラズマの一部はカusp磁場のミラー効果により捕捉され、カusp中央部の密度の増加に寄与していると考えられる。

次にエネルギーアナライザの結果について考察する。速度分布のピークの位置がカusp面の通過に伴い、低エネルギー側に移動したように見えるのは、粒子の運動エネルギーの絶対値が変化したのではなく、カusp磁場通過に伴い速度の方向が変わったためと考えられる。

また、カusp面の後方において低エネルギーの成分が増えたのは、カusp磁場に捕捉されたプラズマの電子（もしくはスローダウンした電子ビーム）が観測されたためであると考えている。カusp前方で観測されなかったのは、ただ単にアナライザが常に電子銃方向を向いているという配置によるもので、カusp面の後方ではアナライザがカusp中心に向いているため捕捉電子はアナライザに入って来られるが、カusp面の前方では入れないためと考えられる。

今回は初歩的な結果を述べるにとどまったが、今後はカuspプラズマが作る静電ポテンシャルと粒子の加速についてさらに詳しく研究してゆく。また、この実験では、電子ビームを使ってプラズマを生成しているため、プラズマの分布や密度を自由に変えることができない問題があるため、今後は電子ビームとは独立にプラズマを生成することも検討したい。

## 謝辞

本研究は JAXA 宇宙科学研究所スペースチャンバー共同利用の支援を受けて実施されました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

1. R. B. Sheldon, et al. *Geophysical Research Letters*, vol. 25, pp.1825-1828, 1998.
2. 鶴田浩一郎, 小特集：スペースプラズマにおける電場形成とその効果 2.オーロラ上空の電場構造, *J. Plasma Fusion Res.* vol.78, pp. 1009-1014, 2002.
3. 小原隆博, 特集：宇宙天気予報特集 1 3-1, 通信総合研究所季報, vol.48, no.3, pp. 55-67, 2002.
4. 田中高史, 特集：宇宙天気予報特集 1 3-2, 通信総合研究所季報, vol.48, no.3, pp. 69-92, 2002.
5. 藤田, 安藤, 小谷野, 塚原, 田澤, 谷川, 佐藤, 飽本；「電子ビームの入射による対カuspプラズマの生成についての考察」；平成 27 年度・宇宙科学に関する室内実験シンポジウム 講演集 (2016.3)